

研究生教学用书

交流伺服电机及其控制

寇宝泉 程树康 编著



 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



研究生教学用书

交流伺服电机 及其控制

寇宝泉 程树康 编著

机械工业出版社

本书全面、系统、深入地阐述了交流伺服系统的工作原理、组成及设计方法。

本书第1章介绍了伺服系统的概念、发展过程以及交流伺服系统的构成、分类、性能指标、发展趋势；第2章介绍了感应电机伺服控制系统；第3章介绍了永磁同步电机伺服控制系统；第4章介绍了交流伺服控制系统功率变换电路；第5章介绍了伺服系统常用传感器的工作原理；第6章介绍了交流伺服系统常用的控制策略；第7章介绍了直接驱动交流伺服系统；第8章介绍了直线交流伺服系统。

本书可供高等院校电气工程及其自动化专业本科生、研究生作为教材或参考书使用，也可供科研院所、厂矿企业从事自动化技术的科技工作者参考使用。

图书在版编目 (CIP) 数据

交流伺服电机及其控制/寇宝泉, 程树康编著. —北京:
机械工业出版社, 2008.9
研究生教学用书
ISBN 978-7-111-24828-6

I. 交… II. ①寇…②程… III. 交流电机: 伺服电机-
控制系统 IV. TM383.401.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 121791 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)
策划编辑: 于苏华
责任编辑: 于苏华 蔡家伦 版式设计: 张世琴 责任校对: 魏俊云
封面设计: 陈沛 责任印制: 邓博
北京京丰印刷厂印刷
2008 年 10 月第 1 版·第 1 次印刷
169mm×239mm·17.25 印张·332 千字
标准书号: ISBN 978-7-111-24828-6
定价: 33.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换
销售服务热线电话: (010) 68326294

购书热线电话: (010) 88379639 88379641 88379643

编辑热线电话: (010) 88379711

封面无防伪标均为盗版

前 言

自 20 世纪 80 年代以来,随着现代电机技术、材料技术、传感器技术、电力电子技术、微电子技术、控制技术以及计算机技术等支撑技术的快速发展,伺服控制技术取得了巨大的进步。尤其是矢量控制技术的发展和,使得交流电机高动态响应的转矩控制得以实现,极大地提高了交流伺服系统的性能,从而使得交流伺服系统的电机控制复杂、控制特性差等问题的解决取得了突破性的进展。交流伺服系统在各种应用领域充分展现了高精度、高动态性能、高可靠性、高效率、体积小、重量轻等突出的优势。随着交流伺服系统性能的日益提高,价格日趋合理,交流伺服取代直流伺服、数字控制取代模拟控制、软件控制取代硬件控制成了现代电气伺服驱动系统的一个发展趋势,伺服控制技术步入了一个全新的发展阶段。

为了全面展现伺服系统的最新技术,适应学科发展的需要,结合研究生培养与课程教学,我们编写了《交流伺服电机及其控制》一书。本书的编写原则是既要保证理论体系完整,又要反映本领域内取得的最新理论研究成果与技术发展。本书介绍了伺服系统的基本概念、发展过程,交流伺服系统的构成、分类与发展趋势;详细介绍了感应型与永磁同步型矢量控制系统的构成,交流伺服系统的重要组成部分——功率变换电路、传感器与控制策略;同时还系统地介绍了两种快速发展的新型伺服系统——直接驱动交流伺服系统与直线交流伺服系统。

鉴于上述情况,本书适合作为理工科院校的电气工程及其自动化专业本科生、研究生教材使用,也适合各科研院所从事电机控制相关工作的工程技术人员和科研工作者参考、自学之用。

本书由寇宝泉负责统筹、规划,并完成了第 1~3 章、第 5~8 章的撰写;第 4 章由寇宝泉和曹海川共同编写;曹海川对全书的主要图表进行了绘制;程树康负责全书内容的审阅、修改和完善。

本书的内容参考了较多的国内外相关论文、论著,主要的都已经列在参考文献中,如有个别遗漏,深表歉意并请见谅,同时在此向所有文献的作者们表示深深的谢意。

在本书的编写过程中,得到了作者家人、朋友、同事不同方式的支持和帮助,在此一并表示感谢!

由于本书涉及的技术领域范围广,作者学识有限,加之时间仓促,难免会有疏漏或不当之处,恳请广大读者批评指正。

编 者

2008 年 5 月于哈尔滨工业大学

目 录

前言

第1章 伺服系统概述 1

1.1 伺服系统的基本概念 1

1.1.1 伺服系统的定义 1

1.1.2 伺服系统的组成 1

1.1.3 伺服系统性能的基本 要求 1

1.1.4 伺服系统的种类 2

1.2 伺服系统的发展过程 2

1.3 交流伺服系统的构成 3

1.3.1 交流伺服电机 4

1.3.2 功率变换器 5

1.3.3 传感器 6

1.3.4 控制器 6

1.4 交流伺服系统的分类 7

1.4.1 按伺服系统控制信号的处 理方法分类 7

1.4.2 按伺服系统的控制方式 分类 9

1.5 交流伺服系统的常用性能 指标 10

1.6 伺服系统的发展趋势 12

第2章 感应电机伺服控制 系统 15

2.1 感应电机伺服控制系统的 构成 15

2.2 感应电机的数学模型与 坐标变换 17

2.2.1 矢量控制的基本思路 17

2.2.2 在三相静止坐标系下感应 电机的数学模型 18

2.2.3 坐标变换 22

2.3 感应电机的矢量控制 27

2.3.1 转子磁场定向 M-T 坐标系中 的基本方程 27

2.3.2 转差频率控制 30

2.3.3 解耦控制 32

2.3.4 磁通与电流控制 34

2.3.5 坐标变换的实现 34

2.3.6 弱磁控制 35

2.3.7 M-T 坐标系下感应电机矢量 控制伺服系统的构成 37

2.4 伺服控制感应电机的等效直 流电机常数 38

2.4.1 伺服控制感应电机的等 效电路 38

2.4.2 伺服控制感应电机的等效 直流电机常数 40

2.4.3 伺服控制感应电机的特性框 图与时间常数 42

2.5 关于感应电机的直接转矩 控制 43

第3章 永磁同步电机伺服控 制系统 45

3.1 永磁同步电机伺服控制系统 的构成 45

3.2 永磁同步电机的结构与工 作原理 45

3.3 永磁同步电机的数学模型 50

3.3.1 永磁同步电机的基本 方程 50

3.3.2 永磁同步电机的 d、q 轴数 学模型 53

3.4 正弦波永磁同步电机的矢量 控制方法 55

3.4.1 $i_d=0$ 控制	56	4.3.4 滤波电路的设计	110
3.4.2 最大转矩控制	56	4.3.5 制动电路的设计	111
3.4.3 弱磁控制	57	4.4 PWM 控制技术	112
3.4.4 $\cos\phi=1$ 控制	58	4.4.1 正弦波脉宽调制 (SPWM)	
3.4.5 最大效率控制	59	控制技术	113
3.4.6 永磁同步电机的参数与		4.4.2 电流跟踪型 PWM 控制	
输出范围	60	技术	118
3.5 交流伺服电机的矢量控制		4.4.3 电压空间矢量 PWM 控	
系统	62	制技术	121
3.5.1 状态方程与控制框图	62	第 5 章 交流伺服系统常用的传	
3.5.2 解耦控制与坐标变换的		 感器	130
实现	63	5.1 位置传感器	130
3.5.3 电流控制器的分析与		5.1.1 旋转变压器	130
设计	66	5.1.2 感应同步器	134
3.5.4 速度控制器的设计	70	5.1.3 旋转变压器-数字转	
3.5.5 位置控制器的设计	73	换器	136
3.5.6 d-q 坐标系下永磁同步伺		5.1.4 光电编码器	140
服电机矢量控制系统的		5.1.5 磁性编码器	146
构成	76	5.1.6 几种传感器的对比	150
3.6 永磁同步伺服电机的设计		5.2 速度传感器	151
要点	78	5.2.1 测速发电机	151
3.6.1 电机主要尺寸的确定	78	5.2.2 数字转速传感器	155
3.6.2 电动势的正弦化设计	79	5.3 电流传感器	157
3.6.3 定位转矩的抑制技术	80	5.3.1 霍尔电流传感器	157
第 4 章 交流伺服系统的功率变		5.3.2 电流检测 IC	160
 换电路	82	5.3.3 电阻+绝缘放大器	160
4.1 交流伺服系统功率变换主电路		5.4 电压传感器	161
的构成	82	5.5 温度传感器	161
4.2 功率开关器件	84	第 6 章 交流伺服系统常用的	
4.2.1 功率晶体管 (GTR)	84	 控制策略	164
4.2.2 金属氧化物半导体场效应晶		6.1 基于滞回单元的有限时间	
体管 (MOSFET)	89	整定控制	164
4.2.3 绝缘栅双极型晶体管		6.1.1 基于滞回单元的有限时间	
(IGBT)	96	整定控制的原理	164
4.3 功率变换主电路的设计	104	6.1.2 滞回 (HYS) 单元	167
4.3.1 逆变电路的设计	104	6.2 非线性规范模型跟踪控制	169
4.3.2 缓冲电路的设计	106	6.2.1 非线性规范模型跟踪控	
4.3.3 整流电路的设计	109	制的原理	169

6.2.2 鲁棒补偿器的设计	170	7.1 概述	206
6.3 2自由度控制	172	7.2 直接驱动伺服系统	206
6.3.1 2自由度控制系统的 定义	172	7.2.1 直接驱动伺服系统的 特点	206
6.3.2 2自由度控制系统的 结构形式	173	7.2.2 直接驱动伺服电机应具备 的特性	207
6.3.3 2自由度控制系统的 设计	174	7.2.3 直接驱动伺服电机的结构 及安装形式	208
6.3.4 2自由度 PID 控制	177	7.2.4 直接驱动伺服电机的 分类	209
6.4 H_{∞} 控制	181	7.3 直接驱动交流伺服电机的 研究与发展	211
6.4.1 交流伺服系统的灵敏度 函数和补灵敏度函数	181	7.3.1 电磁型直接驱动交流伺 服电机	211
6.4.2 H_{∞} 混合灵敏度问题	182	7.3.2 动电型直接驱动交流伺 服电机	218
6.4.3 加权函数的选择及 H_{∞} 鲁棒控 制器的设计	184	7.4 关于直接驱动伺服电动机的 控制策略	218
6.5 自适应控制	184	7.5 直接驱动伺服电机的发展方 向分析	219
6.5.1 自校正控制系统 (STCS)	185	第8章 直线交流伺服系统	221
6.5.2 模型参考自适应控制系 统 (MRACS)	185	8.1 概述	221
6.6 滑模变结构控制	188	8.2 直线电动机的工作原理	221
6.6.1 滑模变结构控制原理	188	8.3 直线电动机的分类	222
6.6.2 滑模变结构控制的基 本设计方法	192	8.3.1 按结构型式分类	222
6.7 智能控制	194	8.3.2 按功能用途分类	224
6.7.1 专家系统及专家控制	195	8.3.3 按工作原理分类	225
6.7.2 模糊控制	195	8.4 直线感应电机技术	225
6.7.3 神经网络控制	196	8.4.1 直线感应电动机的基 本结构	225
6.7.4 学习控制	196	8.4.2 直线感应电动机的基 本工作原理	227
6.7.5 预测控制	196	8.4.3 直线感应电机的基本 特性	228
6.8 交流伺服电机的高性能 控制——机械谐振系统的 振动控制	197	8.4.4 直线感应电机的矢量 控制	230
6.8.1 控制对象及问题的 提出	197	8.5 直线永磁同步电机	232
6.8.2 谐振的各种控制方法	198	8.5.1 直线永磁同步电机的基	
第7章 直接驱动交流伺服 系统	206		

本结构	232	8.8.1 传统的控制策略	255
8.5.2 直线永磁同步电机的基 本工作原理	233	8.8.2 现代控制策略	255
8.5.3 直线永磁同步电机的 分类	234	8.8.3 智能控制策略	256
8.5.4 直线永磁同步电机的 d、q 轴数学模型	242	8.9 高速机床直线电机进给伺 服系统	256
8.6 高频响、短行程直线伺 服电机	244	8.9.1 直线电机直接驱动的 优点	256
8.6.1 直流型高频响、短行程 直线伺服电机	244	8.9.2 直线电机直接驱动存 在的关键技术问题	258
8.6.2 磁阻型高频响、短行程 直线伺服电机	246	8.9.3 直线交流伺服电机系统 的主要指标及参数	259
8.7 直线步进电动机	248	8.9.4 直线电机伺服系统的发 展趋势	259
8.7.1 直线步进电动机的工作 原理	249	附录	261
8.7.2 直线步进电动机的结构 分析	252	附录 A 直流伺服电机的主要用语 与定义	261
8.8 关于直线交流伺服电机的 控制策略	254	附录 B 永磁同步伺服电机参数的 等效直流电机换算	261
		参考文献	264

第 1 章 伺服系统概述

伺服系统是以机械参数为控制对象的自动控制系统。在伺服系统中，输出量能够自动、快速、准确地跟随输入量的变化，因此又称之为随动系统或自动跟踪系统。机械参数主要包括位移、角度、力、转矩、速度和加速度。

近年来，随着微电子技术、电力电子技术、计算机技术、现代控制技术、材料技术的快速发展以及电机制造工艺水平的逐步提高，伺服技术已迎来了新的发展机遇，伺服系统由传统的步进伺服、直流伺服发展到以永磁同步电机、感应电机为伺服电机的新一代交流伺服系统。

目前，伺服控制系统不仅在工农业生产以及日常生活中得到了非常广泛的应用，而且在许多高科技领域，如激光加工、机器人、数控机床、大规模集成电路制造、办公自动化设备、卫星姿态控制、雷达和各种军用武器随动系统、柔性制造系统（Flexible Manufacturing System, FMS）以及自动化生产线等领域中的应用也迅速发展。

1.1 伺服系统的基本概念

1.1.1 伺服系统的定义

“伺服系统”是指执行机构按照控制信号的要求而动作，即控制信号到来之前，被控对象是静止不动的；接收到控制信号后，被控对象则按要求动作；控制信号消失之后，被控对象应自行停止。

伺服系统的主要任务是按照控制命令要求，对信号进行变换、调控和功率放大等处理，使驱动装置输出的转矩、速度及位置都能得到灵活方便的控制。

1.1.2 伺服系统的组成

伺服系统是具有反馈的闭环自动控制系统。它由检测部分、误差放大部分、执行部分及被控对象组成。

1.1.3 伺服系统性能的基本要求

- 1) 精度高。伺服系统的精度是指输出量能复现输入量的精确程度。
- 2) 稳定性好。稳定是指系统在给定输入或外界干扰的作用下，能在短暂的

调节过程后,达到新的或者恢复到原来的平衡状态。

3) 快速响应。响应速度是伺服系统动态品质的重要指标,它反映了系统的跟踪精度。

4) 调速范围宽。调速范围是指生产机械要求电机能提供的最高转速和最低转速之比。

5) 低速大转矩。在伺服控制系统中,通常要求在低速时为恒转矩控制,电机能够提供较大的输出转矩;在高速时为恒功率控制,具有足够大的输出功率。

6) 能够频繁地起动、制动以及正反转切换。

1.1.4 伺服系统的种类

伺服系统按照伺服驱动机的不同可分为电气式、液压式和气动式三种;按照功能的不同可分为计量伺服和功率伺服系统,模拟伺服和功率伺服系统,位置伺服、速度伺服和加速度伺服系统等。

电气伺服系统根据电气信号可分为直流伺服系统和交流伺服系统两大类。交流伺服系统又有感应电机伺服系统和永磁同步电机伺服系统两种。

1.2 伺服系统的发展过程

伺服系统的发展经历了由液压到电气的过程,电气伺服系统的发展则与伺服电机的不同发展阶段具有紧密的联系,伺服电机至今已有 50 多年的发展历史,经历了三个主要发展阶段。

第一个发展阶段(20 世纪 60 年代以前):此阶段是以步进电动机驱动的液压伺服马达或以功率步进电动机直接驱动为中心的时代,伺服系统的位置控制多为开环系统。这一时期是液压伺服系统的全盛期。液压伺服系统能够传递巨大的转矩,控制简单,可靠性高,在整个速度范围内保持恒定的转矩输出,主要应用在重型设备和一些关键场合,比如机场设备。但它也存在一些缺点,例如发热大、效率低、易污染环境、不易维修等。

第二个发展阶段(20 世纪 60~70 年代):这一阶段是直流伺服电机的诞生和全盛发展的时代,由于直流电机具有优良的调速性能,很多高性能驱动装置采用了直流电机,伺服系统的位置控制也由开环系统发展成为闭环系统。但是,直流伺服电机存在机械结构复杂、维护工作量大等缺点,在运行过程中转子容易发热,影响了与其连接的其他机械设备的精度,难以应用到高速及大容量的场合,换向器成为直流伺服驱动技术发展的瓶颈。由于人们通过材料和工艺的改进来尽量提高直流伺服的生命力,因此直流伺服电机仍将在相当长的时间内得到应用,只是市场份额预计会持续下降。

第三个发展阶段（20世纪80年代至今）：这一阶段是以机电一体化时代作为背景的。由于伺服电机结构及永磁材料、半导体功率器件技术、控制技术的突破性进展，出现了无刷直流伺服电机（方波驱动）、交流伺服电机（正弦波驱动）、矢量控制的感应电机和开关磁阻电机等新型电机。尤其是80年代以来，矢量控制技术的不断成熟，极大地推动了交流伺服驱动技术的发展，使交流伺服驱动系统的性能可以与直流伺服系统媲美。伺服驱动装置经历了模拟式—数字模拟混合式—全数字化的发展。伺服系统控制器的实现方式在数字控制中也在由硬件方式向着软件方式发展；在软件方式中也是从伺服系统的外环向内环、进而向接近电动机环路的更深层发展。

交流伺服电机克服了直流伺服电机存在的电刷、换向器等机械部件所带来的各种缺点，过载能力强和转动惯量低体现出了交流伺服系统的优越性。交流伺服系统采用以微处理器为基础的系统级芯片和智能化功率器件，很好地克服了伺服系统中模型参数变化和非线性等不确定因素，提高了系统的鲁棒性和容错性，成功实现了高精度伺服控制。特别是控制理论的新发展及智能控制的兴起和不断成熟，加之计算机技术、微电子技术的迅猛发展，使基于智能控制理论的先进控制策略和基于传统控制理论的传统控制策略完美结合，为交流伺服系统的实际应用奠定了坚实的基础。

1.3 交流伺服系统的构成

交流伺服系统如图1-1所示，通常由交流伺服电机，功率变换器，速度、位置传感器及位置、速度、电流控制器构成。

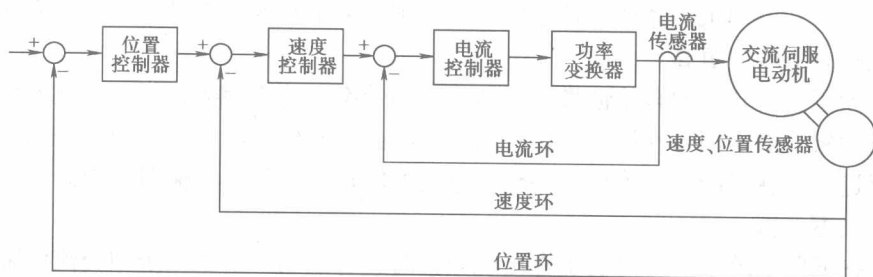


图 1-1 交流伺服系统

交流伺服系统具有电流反馈、速度反馈和位置反馈的三闭环结构形式，其中电流环和速度环为内环（局部环），位置环为外环（主环）。电流环的作用是使电机绕组电流实时、准确地跟踪电流指令信号，限制电枢电流在动态过程中不超

过最大值,使系统具有足够大的加速转矩,提高系统的快速性。速度环的作用是增强系统抗负载扰动的能力,抑制速度波动,实现稳态无静差。位置环的作用是保证系统静态精度和动态跟踪的性能,这直接关系到交流伺服系统的稳定性和能否高性能运行,是设计的关键所在。

当传感器检测的是输出轴的速度、位置时,系统称为半闭环系统;当检测的是负载的速度、位置时,称为闭环系统;当同时检测输出轴和负载的速度、位置时,称为多重反馈闭环系统。

1.3.1 交流伺服电机

交流伺服电机的电机本体为三相永磁同步电机或三相笼型感应电机,其功率变换器采用三相电压型 PWM 逆变器。在数十瓦的小容量交流伺服系统中,也有采用电压控制两相高阻值笼型感应电机作为执行元件的,这种系统称为两相交流伺服系统。

采用三相永磁同步电机的交流伺服系统,相当于把直流电机的电刷和换向器置换成由功率半导体器件构成的开关,因此很多时候称之为无刷直流伺服电机;有时交流伺服电机单指采用了三相笼型感应电机的伺服电机,当把两者一同叫做交流伺服电机时,通常称前者为同步型交流伺服电机,称后者为感应型交流伺服电机。

1. 同步型交流伺服电机(无刷直流伺服电机)

交流伺服电机中最为普及的是同步型交流伺服电机,其励磁磁场由转子上的永磁体产生,通过控制三相电枢电流,使其合成电流矢量与励磁磁场正交而产生转矩。由于只需控制电枢电流就可以控制转矩,因此比感应型交流伺服电机控制简单。而且利用永磁体产生励磁磁场,特别是数千瓦的小容量同步型交流伺服电机比感应型效率更高。

为了减小转子的转动惯量、提高电机的效率和功率因数,同步型交流伺服电机的励磁一般采用磁性能好的稀土永磁体。由于永磁体存在去磁问题,如果电枢电流过大,就可能产生不可逆去磁,电机的转矩就不能正常输出,因此必须限制最大电枢电流。

在伺服系统中,有时要求在出现异常时进行制动,由于同步型交流伺服电机的转子上有永磁体,故用接触器和电阻把电枢绕组短路,就可以实现制动。

2. 感应型交流伺服电机

近年来,随着电力电子技术、微处理器技术与磁场定向控制技术的快速发展,使感应电机可以达到与他励式直流电机相同的转矩控制特性,再加上感应电机本身价格低廉、结构坚固及维护简单,因此感应电机逐渐在高精密速度及位置控制系统中得到越来越广泛的应用。

感应电机的定子电流包含相当于直流电机励磁电流与电枢电流两个成分,把这两个成分分解成正交矢量进行控制的新型控制理论——矢量控制理论出现之后,感应电机作为伺服电机才开始实用化。

感应型交流伺服电机的转矩控制比同步型复杂,但是电机本身具有很多优点,作为伺服电机主要应用于较大容量的伺服系统中。

感应型交流伺服电机在空载状态也需要励磁电流,这点与同步型不同。异常时的制动需要通过机械式制动或由预先准备好的直流电源进行直流制动。

3. 两种交流伺服电机的比较

(1) 同步型交流伺服电机

- 1) 正弦波电流控制稍复杂,转矩波动小。
- 2) 方波电流控制较为简单,转矩波动较大。
- 3) 采用稀土永磁体励磁,功率密度高。
- 4) 电子换相,不需维护,散热好,惯量小,峰值转矩大。
- 5) 弱磁控制难,不适合恒功率运行。
- 6) 要注意高温及大电流可能引起的永磁体去磁。

(2) 感应型交流伺服电机

- 1) 采用磁场定向控制,转矩控制原理类似直流伺服。
- 2) 需要无功的励磁电流,损耗稍大。
- 3) 设计上要减小漏感及磁路饱和的影响。
- 4) 利用弱磁控制,适合高速及恒功率运行。
- 5) 结构简单、坚固,适合大功率应用。
- 6) 控制复杂,参数易受转子温升影响。

1.3.2 功率变换器

交流伺服系统功率变换器的主要功能是根据控制电路的指令,将电源单元提供的直流电能转变为伺服电机电枢绕组中的三相交流电流,以产生所需要的电磁转矩。功率变换器主要包括控制电路、驱动电路、功率变换主电路等。

功率变换主电路主要由整流电路、滤波电路和逆变电路三部分组成。为了保证逆变电路的功率开关器件能够安全、可靠地工作,对于高压、大功率的交流伺服系统,有时需要有抑制电压、电流尖峰的“缓冲电路”。另外,对于频繁运行于快速正反转状态的伺服系统,还需要有消耗多余再生能量的“制动电路”。

控制电路主要由运算电路、PWM生成电路、检测信号处理电路、输入输出电路、保护电路等构成,其主要作用是完成对功率变换主电路的控制和实现各种保护功能等。

驱动电路的主要作用是根据控制信号对功率半导体开关器件进行驱动,并为

器件提供保护,主要包括开关器件的前级驱动电路和辅助开关电源电路等。

值得一提的是集驱动电路、保护电路和功率变换主电路于一体的智能功率模块,改变了伺服系统逆变电路的传统设计方式,实现了功率开关器件的优化驱动和实时保护,提高了逆变电路的性能,是逆变电路的一个发展方向。

1.3.3 传感器

在伺服系统中,需要对伺服电机的绕组电流及转子速度、位置进行检测,以构成电流环、速度环和位置环,因此需要相应的传感器及其信号变换电路。

电流检测通常采用电阻隔离检测或霍尔电流传感器。直流伺服电机只需一个电流环,而交流伺服电机(两相交流伺服电机除外)则需要两个或三个。其构成方法也有两种:一种是交流电流直接闭环;另一种是把三相交流变换为旋转正交双轴上的矢量之后再闭环,这就需要把电流传感器的输出信号进行坐标变换的接口电路。

速度检测可采用无刷测速发电机、增量式光电编码器、磁编码器或无刷旋转变压器。位置检测通常采用绝对式光电编码器或无刷旋转变压器,也可采用增量式光电编码器进行位置检测。由于无刷旋转变压器具有既能进行转速检测又能进行绝对位置检测的优点,且抗机械冲击性能好,可在恶劣环境下工作,在交流伺服系统中的应用日趋广泛。

1.3.4 控制器

在交流电机伺服系统中,控制器的设计直接影响着伺服电机的运行状态,从而在很大程度上决定了整个系统的性能。

交流电机伺服系统通常有两类,一类是速度伺服系统;另一类为位置伺服系统。前者的伺服控制器主要包括电流(转矩)控制器和速度控制器,后者还要增加位置控制器。其中电流(转矩)控制器是最关键的环节,因为无论是速度控制还是位置控制,最终都将转化为对电机的电流(转矩)控制。电流环的响应速度要远远大于速度环和位置环。为了保证电机定子电流响应的快速性,电流控制器的实现不应太复杂,这就要求其设计方案必须恰当,使其能有效地发挥作用。对于速度和位置控制,由于其时间常数较大,因此可借助计算机技术实现许多较复杂的基于现代控制理论的控制策略,从而提高伺服系统的性能。

1. 电流控制器

电流环由电流控制器和逆变器组成,其作用是使电机绕组电流实时、准确地跟踪电流指令信号。为了能够快速、精确地控制伺服电机的电磁转矩,在交流伺服系统中,需要分别对永磁同步电机(或感应电机)的 d 、 q 轴(或 M 、 T 轴)电流进行控制。 q 轴(或 T 轴)电流指令来自于速度环的输出; d 轴(或 M 轴)

电流指令直接给定, 或者由磁链控制器给出。将电机的三相反馈电流进行 $3/2$ 旋转变换, 得到 d 、 q 轴(或 M 、 T 轴)的反馈电流。 d 、 q 轴(或 M 、 T 轴)的给定电流和反馈电流的差值, 通过电流控制器得到给定电压, 再根据 PWM 算法产生 PWM 信号(详见第4章)。

2. 速度控制器

速度环的作用是保证电机的转速与速度指令值一致, 消除负载转矩扰动等因素对电机转速的影响。速度指令与反馈的电机实际转速相比较, 其差值通过速度控制器直接产生 q 轴(或 T 轴)指令电流, 并进一步与 d 轴(或 M 轴)电流指令共同作用, 控制电机加速、减速或匀速旋转, 使电机的实际转速与指令值保持一致。速度控制器通常采用的是 PI 控制方式, 对于动态响应、速度恢复能力要求特别高的系统, 可以考虑采用变结构(滑模)控制方式或自适应控制方式等。

3. 位置控制器

位置环的作用是产生电机的速度指令并使电机准确定位和跟踪。通过比较设定的目标位置与电机的实际位置, 利用其偏差通过位置控制器来产生电机的速度指令, 当电机起动后在大偏差区域, 产生最大速度指令, 使电机加速运行后以最大速度恒速运行; 在小偏差区域, 产生逐次递减的速度指令, 使电机减速运行直至最终定位。为避免超调, 位置环的控制器通常设计为单纯的比例(P)调节器。为了系统能实现准确的等速跟踪, 位置环还应设置前馈环节。

1.4 交流伺服系统的分类

1.4.1 按伺服系统控制信号的处理方法分类

1. 模拟控制方式

模拟控制交流伺服系统的显著标志是其调节器及各主要功能单元由模拟电子器件构成, 偏差的运算及伺服电机的位置信号、速度信号均用模拟信号来控制。系统中的输入指令信号、输出控制信号及转速和电流检测信号都是连续变化的模拟量, 因此控制作用是连续施加于伺服电机上的。

模拟控制方式的特点是:

- 1) 控制系统的响应速度快, 调速范围宽。
- 2) 易于与常见的输出模拟速度指令的 CNC (Computerized Numerical Control) 接口。
- 3) 系统状态及信号变化易于观测。
- 4) 系统功能由硬件实现, 易于掌握, 有利于使用者进行维护、调整。

5) 模拟器件的温漂和分散性对系统的性能影响较大, 系统的抗干扰能力较差。

6) 难以实现较复杂的控制算法, 系统缺少柔性。

2. 数字控制方式

数字控制交流伺服系统的明显标志是其调节器由数字电子器件构成, 目前普遍采用的是微处理器、数字信号处理器 (DSP) 及专用 ASIC (Application specific Integrated Circuit) 芯片。系统中的模拟信号 (如电流反馈信号和旋转变压器输出的转角信号) 需经过离散化 (采用 A/D 转换和 R/D (Resolver-to-Digital) 转换) 后, 以数字量的形式参与控制。以微处理器技术为基础的数字控制方式的特点是:

1) 系统的集成度较高, 具有较好的柔性, 可实现软件伺服。

2) 温度变化对系统的性能影响小, 系统的重复性好。

3) 易于应用现代控制理论, 实现较复杂的控制策略。

4) 易于实现智能化的故障诊断和保护, 系统具有较高的可靠性。

5) 易于与采用计算机控制的系统相接。

3. 数字-模拟混合控制方式

由于数字控制方式的响应速度由微处理器的运算速度决定, 在现有技术条件下, 要实现包括电流调节器在内的全数字控制, 就必须采用 DSP 等高性能微处理器芯片, 这导致全数字控制系统结构复杂、成本较高。为满足电流调节快速性的要求, 全数字控制永磁交流伺服系统产品中, 电流调节器虽已数字化, 但其控制策略一般仍采用 PID 调节方式。同时, 考虑到系统中模拟传感器 (如电流传感器) 的温漂和信号噪声的干扰及其数字化时引入的误差的影响, 全数字化控制在性价比上并没有明显的优势。

目前永磁交流伺服系统产品中常用的是数模混合式控制方式, 即伺服系统的内环调节器 (如电流调节器) 采用模拟控制, 外环调节器 (如速度调节器和位置调节器) 采用数字控制。数模混合式控制兼有数字控制的高精度、高柔性和模拟控制的快速性、低成本的优点, 成为现有技术条件下满足机电一体化产品发展对高性能伺服驱动系统需求的一种较理想的伺服控制方式, 在数控机床和工业机器人等机电一体化装置中得到了较为广泛的应用。

4. 软件伺服控制方式

位置与速度反馈环的运算处理全部由微处理器进行处理的伺服控制, 称为软件伺服控制。

伺服控制时, 脉冲编码器、测速发电机检测到的电机转角和速度信号输入到微处理器内, 微处理器中的运算程序对上述信号按照采样周期进行运算处理后发出伺服电机的驱动信号, 对系统实施伺服控制。这种伺服控制方法不但硬件结构

简单,而且软件可以灵活地对伺服系统做各种补偿。但是,因为微处理器的运算程序直接插入到伺服系统中,所以若采样周期过长,对伺服系统的特性就有影响,不但使控制性能变差,还使得伺服系统变得不稳定。这就要求微处理器具有高速运算和高速处理的能力。

基于微处理器的全数字伺服(软件伺服)控制器与模拟伺服控制器相比,具有以下优点:

1) 控制器硬件体积小、成本低。随着高性能、多功能微处理器的不断涌现,伺服系统的硬件成本变得越来越低。体积小、重量轻、耗能少是数字类伺服控制器的共同优点。

2) 控制系统的可靠性高。集成电路和大规模集成电路的平均无故障时间(MTBF)远比分立元件电子电路要长;在电路集成过程中采用有效的屏蔽措施,可以避免主电路中过大的瞬态电流、电压引起的电磁干扰问题。

3) 系统的稳定性好、控制精度高。数字电路温漂小,也不存在参数的影响。

4) 硬件电路标准化容易。可以设计统一的硬件电路,软件采用模块化设计,组合构成适用于各种应用对象的控制算法,以满足不同的用途。软件模块可以方便地增加、更改、删减,或者当实际系统变化时彻底更新。

5) 系统控制的灵活性好,智能化程度高。高性能微处理器的广泛应用,使信息的双向传递能力大大增强,容易和上位机联网运行,可随时改变控制参数;提高了信息监控、通信、诊断、存储及分级控制的能力,使伺服系统趋于智能化。

6) 控制策略的更新、升级能力强。随着微处理器芯片运算速度和存储器容量的不断提高,性能优异但算法复杂的控制策略有了实现的基础,为高性能伺服控制策略的实现提供了可能性。

1.4.2 按伺服系统的控制方式分类

1. 开环伺服系统

开环伺服系统没有速度及位置测量元件,伺服驱动元件为步进电机或电液脉冲马达。控制系统发出的指令脉冲,经驱动电路放大后,送给步进电机或电液脉冲马达,使其转动相应的步距角度,再经传动机构,最终转换成控制对象的移动。由此可以看出,控制对象的移动量与控制系统发出的脉冲数量成正比。

由于这种控制方式对传动机构或控制对象的运动情况不进行检测与反馈,输出量与输入量之间只有前向作用,没有反向联系,故称为开环伺服系统。

显然开环伺服系统的定位精度完全依赖于步进电机或电液脉冲马达的步距精